

# Pertinence et limitations des modèles d'impédance acoustique au niveau de parois multiperforées des chambres de combustion aéronautiques

J. L. FLORENCIANO<sup>a,b</sup>, P. BRUEL<sup>a</sup>, N. SAVARY<sup>b</sup>, T. KOUSKSOU<sup>c</sup>

a. Laboratoire de Mathématiques et leur Applications, CNRS et Université de Pau et des Pays de l'Adour, Avenue de l'Université, BP 1155, 64013 PAU, France

b. Service Combustion, TURBOMECA, Avenue Joseph Szydlowski, 64511 BORDES Cedex, France

c. Laboratoire des Sciences pour l'Ingénieur en Mécanique et Génie Électrique, Université de Pau et des Pays de l'Adour, ENSGTI, Rue Jules ferry, 64075 PAU, France.

## Résumé :

*L'étude thermo-acoustique de chambres de combustion aéronautiques requiert l'implémentation de conditions aux limites pertinentes. Ceci passe en particulier, par la modélisation de l'impédance acoustique associée aux parois multiperforées. La présente étude établit un panorama d'ensemble des approches théoriques et des modèles d'impédance acoustique considérés jusqu'à présent en précisant les conditions d'emploi et limitations éventuelles pour le cas spécifique d'une paroi multiperforée de chambre de combustion.*

## Abstract :

*The thermo-acoustic study of aeronautic combustion chambers requires the implementation of suitable boundary conditions. It especially involves the modelling of the acoustic impedance associated with multi perforated walls. This work presents a panorama of different theoretical approximations and impedance acoustics models that have been used and their work conditions and limitations for the specific case of multi perforated wall of combustion chamber.*

**Mots clefs :** effusion cooling, bias-flow, grazing-flow, impédance acoustique

## 1 Introduction

Le développement de turbines à gaz moins polluantes tout en restant performantes requiert la mise au point de chambres de combustion au sein desquelles l'amélioration du contrôle des processus d'injection de combustible, de mélange avec l'air issu du compresseur et de réaction chimique est cruciale. Dans ce cadre, le recours partiel à des zones de combustion en régime pauvre, pré mélangé et pré vaporisé est l'un des moyens retenus qui est néanmoins connu pour favoriser le couplage de type thermo acoustique au sein de la chambre. Il est donc nécessaire de concevoir ces nouveaux systèmes afin d'éviter l'apparition de ce type de phénomène indésirable. Ceci passe en particulier par la caractérisation des modes propres acoustiques de la chambre de combustion sur la base d'essais ou de simulations numériques. Pour ces dernières, la prescription de conditions aux limites pertinentes au niveau des parois de la chambre est essentielle mais délicate. En effet, la présence au niveau de ces parois de zones de multiperforations, destinées à établir une couche d'air froid protectrice, rend difficile la détermination de leur réponse acoustique. Cette dernière est conditionnée par l'impédance acoustique qui dépend i) des paramètres géométriques (taille, forme et inclinaison des perçages) et ii) des caractéristiques aérodynamiques des deux écoulements convergents sur la paroi (i.e. les jets froids issus des perforations (ou « bias flow ») et l'écoulement chaud transverse à l'intérieur de la chambre (ou « grazing flow »).

La plupart des travaux de modélisation de l'impédance acoustique de multiperforations ne considèrent que l'un des deux écoulements. Il a néanmoins été démontré expérimentalement [1] que les effets sur l'impédance acoustique de la présence simultanée des deux écoulements ne sont pas une simple addition de leurs deux contributions estimées pour chacun d'eux considérés isolément. L'impédance de paroi dépend en effet de l'interaction entre les deux écoulements. Ceci concerne en particulier le mécanisme de dissipation d'énergie acoustique par lâcher tourbillonnaire au niveau du bord des perforations. En absence d'écoulements, le lâcher tourbillonnaire est induit par l'onde acoustique elle-même et n'est alors possible que pour des niveaux

de pression acoustique élevés. On se situe alors dans un régime non-linéaire de dissipation.

En présence d'un « bias flow » permanent, le processus est notablement différent. En effet, c'est l'interaction directe entre l'onde acoustique et les instabilités hydrodynamiques du jet au niveau du bord de la perforation qui contribue à la génération de tourbillons qui sont entraînés par l'écoulement puis dissipés par viscosité. C'est ce mécanisme de transfert d'énergie du champ acoustique vers le champ tourbillonnaire qui contribue alors de manière prépondérante à l'amortissement acoustique [2] [3]. Il est nécessaire de souligner que l'obtention d'un modèle analytique pour ce phénomène requiert de supposer que l'écoulement est incompressible et non-visqueux [3]. Cependant, dans certaines conditions, l'effet de la dissipation visco-thermique doit être pris en compte. Ainsi, Roche et al. [4] [5] ont quantifié la contribution de chacun de ces deux processus de dissipation pour un résonateur Helmholtz sans « bias flow ». Avec un diamètre de col inférieur au millimètre, ces auteurs ont montré que la contribution de la dissipation visco-thermique était certes dominée par celle liée au lâcher tourbillonnaire mais qu'elle n'était néanmoins pas négligeable. Il apparaît ainsi que ces deux mécanismes prépondérants doivent être modélisés. Les modèles d'impédance acoustique développés sur la base des observations précédentes se rapportent néanmoins à des configurations de perforations très simplifiées par rapport à celles d'une paroi de chambre de combustion réelle. En conséquence, l'objectif de la présente étude est d'établir un panorama d'ensemble des approches théoriques et des modèles d'impédance acoustique considérés jusqu'à présent et d'en préciser les conditions d'emploi et limitations éventuelles pour le cas spécifique d'une paroi multiperforée de chambre de combustion.

## 2 Aérodynamique des parois multiperforées pour le refroidissement par effusion

La caractérisation aérodynamique de l'écoulement autour des parois multiperforées de chambre de combustion présente un intérêt spécial afin d'évaluer les différents mécanismes de dissipation acoustique qui y ont lieu. L'évolution de l'écoulement à travers les perçages de chambre a été largement étudiée dans le cadre du refroidissement [6] [7] [8]. Elle dépend fortement de la forme et de l'inclinaison des perforations par rapport à la direction de l'écoulement transverse ou « grazing flow ». Les perçages sont en général coniques de par le processus de fabrication et l'épaisseur de la tôle métallique qui est de l'ordre du millimètre. La température caractéristique des gaz brûlés de l'intérieur de la chambre est de l'ordre de 2000 K pour un niveau de pression de fonctionnement se situant aux alentours de 10 bar. L'air de refroidissement prélevé en aval du compresseur est caractérisé par un niveau de température de l'ordre de 600 K. La vitesse moyenne de l'écoulement à l'intérieur des perforations est de l'ordre de 100 m/s alors que les vitesses moyennes de l'écoulement transverse se situent aux alentours de 10 m/s. L'évolution du champ tourbillonnaire le long de la trajectoire du jet est bien identifiée dans le cadre du problème académique des jets en écoulement transverse, notamment pour les jets isothermes qui débouchent perpendiculairement par rapport à l'écoulement transverse [9] [10]. On observe dans ce cas la formation de quatre types de structure tourbillonnaire à grande échelle caractéristiques de cette configuration d'écoulement. Les tourbillons de la couche de cisaillement, générés à cause de l'instabilité de Kelvin – Helmholtz, ont une forme toroïdale au niveau du bord de l'orifice. A fur et à mesure que les tourbillons sont entraînés par l'écoulement, ils se déforment et se replient au niveau de la zone postérieure du jet. Ce phénomène s'explique par le gradient de pression longitudinal qu'impose la présence du corps du jet. Les autres structures caractéristiques de ce type d'écoulement sont ensuite: le tourbillon en « fer à cheval », généré par l'interaction de la couche limite de l'écoulement transverse avec le jet, la paire de tourbillons contrarotatifs (CVP) qui se forme progressivement au sein du jet et les tourbillons de sillage, considérés par certains auteurs [11] comme une réminiscence de l'allée tourbillonnaire de Von Karman. La caractérisation du champ tourbillonnaire pour les jets transverses inclinés d'une paroi multiperforée de chambre de combustion est difficile à réaliser *in situ* à cause notamment des conditions thermiques qui y règnent. Mendez [8] a réalisé des simulations numériques basée sur une approche de type simulation des grandes échelles (LES) pour la configuration générique de l'écoulement autour d'une plaque plane multiperforée (Fig. 1a) en prenant en compte l'effet de l'inclinaison et de l'éventuelle différence de température entre les écoulements présents de part et d'autre de la plaque. Il a observé un décollement de la couche limite à l'intérieur du perçage lié à son inclinaison (Fig. 1b). Ceci entraîne une nette dissymétrie du profil de vitesse moyenne au niveau de la section de sortie des jets également observée par Most [6] et Michel [7].

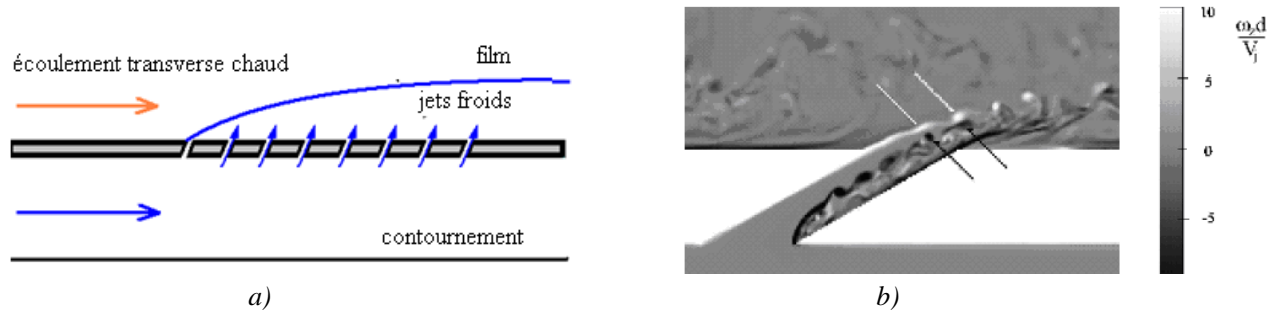


Fig. 1 : Configuration de type jet en écoulement transverse : a) Géométrie d'ensemble ; b) Exemple de la structure instantanée de l'écoulement au sein du trou obtenue par Mendez [8] par simulation LES.

De plus, Mendez [8] a observé que la formation du CVP intervenait dans la région proche du bord de trou et pas en aval comme dans le cas des jets débouchant perpendiculairement. Un deuxième tourbillon contrarotatif plus faible que le CVP principal a également été identifié. La comparaison entre simulations isothermes et non-isothermes, avec le même rapport de quantité de mouvement jet-écoulement transverse, n'a pas révélé de changement notable de la topologie de l'écoulement. L'effet d'une différence de température se traduit par une pénétration sensiblement moins importante des jets dans le cas non-isotherme (injection d'air froid dans un écoulement transverse d'air chaud).

### 3 Mécanismes de dissipation acoustique et modèles d'impédance

Les modèles analytiques d'impédance répertoriés se différencient en premier lieu par la prise en compte ou non soit de l'écoulement transverse, soit de l'écoulement dans les perforations. Aucun modèle analytique prenant en compte simultanément ces deux écoulements n'a été identifié.

#### Modèles d'impédance sans écoulement

Parmi les différentes approches traitant du cas sans aucun écoulement, il faut souligner ici le travail de Melling [12] qui servi de base par la suite à l'élaboration de différents modèles semi-empiriques. Basé sur la théorie de Crandall [13] pour déterminer la résistance liée au régime linéaire de dissipation visqueuse classique, le modèle de Melling [12] prend en compte l'effet lié à l'épaisseur non nulle de la plaque perforée. De plus, Melling [12] a également introduit une expression de la résistance acoustique spécifique au régime non linéaire de dissipation lié à la prise en compte de l'effet de la vitesse acoustique à la perforation, soit :

$$R = \frac{1}{\rho c} \left\{ \overbrace{R_\mu}^{\text{linéaire}} + \overbrace{\frac{8}{3\pi} \left[ \frac{1}{C_D^2} \left( \frac{1-\sigma^2}{\sigma^2} \right) \left( \frac{\rho}{2} \right) \cdot V_n \right]}^{\text{non-linéaire}} \right\} \quad (1)$$

où  $V_n$  est la vitesse acoustique à travers l'orifice,  $\rho$  la masse volumique,  $\sigma$  la porosité de la paroi et  $C_D$  le coefficient de décharge. Les récentes études numériques et expérimentales de Roche et al. [4] [5] d'un résonateur d'Helmholtz cylindrique ont permis d'identifier les mécanismes de dissipation acoustique qui prévalent selon les conditions de fonctionnement. Pour les faibles niveaux de pression, c'est la friction visqueuse sur les parois intérieures du col du résonateur et la radiation acoustique qui dominent (régime linéaire de dissipation, jusqu'à 120dB approximativement). Pour les forts niveaux de pression, c'est le mécanisme de dissipation acoustique lié au lâcher tourbillonnaire généré par la vitesse acoustique qui l'emporte (d'où un régime dissipatif non linéaire).

#### Modèles d'impédance avec écoulement

Les deux configurations génériques généralement associées à ces modèles sont représentées sur la figure 2. Howe [3] et Bechert [2] ont mis en évidence l'effet du lâcher tourbillonnaire sur la dissipation d'énergie acoustique en présence d'un écoulement au sein des perforations (« bias flow »). Howe [15] a montré que le processus de lâcher tourbillonnaire est cette fois entièrement contrôlé par la vitesse de l'écoulement et qu'il conduit alors à un mécanisme linéaire de dissipation acoustique qu'il convient donc d'étudier et de

modéliser. En présence d'un tel « bias flow » permanent, c'est l'interaction directe entre l'onde acoustique et les instabilités hydrodynamiques du jet au niveau du bord de la perforation qui contribue à la génération des tourbillons annulaires de la couche cisailée à la fréquence de l'excitation. Les tourbillons sont ensuite entraînés par l'écoulement et ultérieurement détruits par dissipation visqueuse.



Fig. 2 : Les deux configurations génériques le plus souvent considérées pour établir les modèles d'impédance acoustique de parois multiperforées avec écoulement..

En présence d'un écoulement tangentiel (« grazing flow »), on retrouve un processus analogue. La couche cisailée qui se développe à partir du bord d'attaque de l'ouverture est excitée par la présence de l'onde acoustique ce qui intensifie la génération de tourbillons qui sont ensuite convectés par l'écoulement. Parmi les configurations génériques étudiées de façon théorique, on trouve la modélisation d'Howe pour une plaque infinie mince en présence du « bias-flow » [3] ou du « grazing flow » [16]. Howe [3] [16] a proposé pour chaque cas une démarche qui permet de calculer la conductivité de Rayleigh  $K_R$  qui quantifie le rapport entre les fluctuations du débit à travers la perforation et le saut de pression acoustique (conductivité) soit  $K_R = \frac{i\rho_0\omega\hat{Q}}{\hat{p}^+ - \hat{p}^-}$ . Dans cette expression,  $\hat{Q}$  désigne l'amplitude des fluctuations de débit à travers la

perforation,  $\rho_0$  la masse volumique du fluide,  $\hat{p}^+ - \hat{p}^-$  le saut d'amplitudes acoustiques des deux côtés de la paroi perforée et  $\omega$  la fréquence angulaire de l'onde acoustique. La figure 3 présente une évolution typique de la conductivité de Rayleigh (partie réelle  $\Gamma_R$  et imaginaire  $\Delta_R$ ) en fonction de la pulsation réduite obtenue dans le cas avec « bias flow » ou avec « grazing flow ». Le modèle prenant en compte le bias-flow a été largement validé de façon numérique et expérimentale pour des configurations des parois perforées pour lesquelles les hypothèses du modèle étaient satisfaites [20] [21]. De même, des modifications ont été apportées au modèle de base afin de prendre en compte l'épaisseur de la paroi [22].

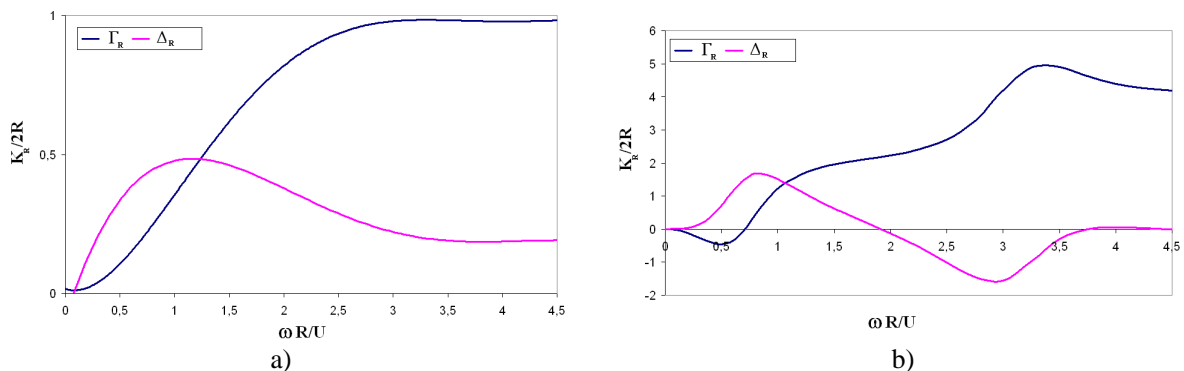


Fig. 3 : Conductivité de Rayleigh d'après les modèles de Howe pour une ouverture circulaire en présence de: a) « bias flow » [3] et b) « grazing flow » [16] (courbe tracée à partir des données de Scott [23]).

#### 4 Application des modèles à une paroi multiperforée de chambre de combustion

Actuellement, l'un des modèles analytiques le plus utilisé pour la caractérisation des liners de paroi multiperforées de chambre de combustion apparaît être celui de Howe [3]. Intéressons nous donc de plus près aux hypothèses de base qui ont présidé à son établissement et confrontons les aux conditions d'écoulement réellement présentes au sein d'une chambre de combustion. Le modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- H1 : le mécanisme de dissipation d'énergie acoustique est le lâcher tourbillonnaire en bord de trou lié au seul « bias flow ».

- H2 : l'excitation acoustique est à basse fréquence i.e. sa longueur d'onde est beaucoup plus grande que le rayon  $R$  de la perforation.
- H3 : la plaque est infiniment mince.
- H4 : l'écoulement au sein du trou est à grand nombre de Reynolds et la viscosité n'intervient que via la condition de vitesse nulle aux lèvres de la perforation afin de générer le lâcher tourbillonnaire.
- H5 : le nombre de Mach de l'écoulement est faible et le régime d'écoulement du fluide est considéré comme incompressible dans les zones proches à l'ouverture.
- H6 : la séparation entre ouvertures est grande afin de pouvoir négliger l'interaction entre les différents jets.
- H7 : l'extension radiale de la zone rotationnelle de l'écoulement au sein du trou donnée par  $\sqrt{\frac{ve}{U}}$  où  $e$  est une distance qui est comparable à l'épaisseur de la plaque et  $U$  la vitesse de convection du « bias flow » est telle que  $\sqrt{\frac{ve}{U}} \ll R$ .

Ces hypothèses permettent alors d'écrire l'équation de quantité de mouvement pour un fluide incompressible non visqueux en fonction d'un potentiel de perturbation de l'enthalpie statique pour arriver à l'expression analytique suivante de la conductivité de Rayleigh :

$$K_R = 2R(\Gamma_R - i\Delta_R) = 2R \left( 1 + \frac{\frac{\pi}{2} I_1(St) \cdot e^{-St} - iK_1(St) \sinh(St)}{St \cdot \left( \frac{\pi}{2} I_1(St) \cdot e^{-St} + iK_1(St) \cosh(St) \right)} \right) \quad (2)$$

où  $I_1$  et  $K_1$  sont les fonctions de Bessel modifiées et  $St$  est le nombre de Strouhal défini avec la vitesse de convection du « bias flow » ( $U$ ) et le rayon de l'ouverture. Voyons maintenant si les hypothèses ci-dessus sont toujours satisfaites au niveau de la paroi multiperforée d'une chambre de combustion :

1. H1 ne prend pas en compte la présence de l'écoulement transverse pourtant bien présent au niveau d'une chambre de combustion.
2. H3 et H4 sont questionnables. En effet, les plaques ont un rapport entre le diamètre de trou et sa longueur de l'ordre de l'unité. Les effets d'absorption par la turbulence de paroi [15] à l'intérieur des perçages doivent être considérés. Il est donc *a priori* important de considérer la possibilité d'une perte d'énergie acoustique par interaction du son avec les couches limites turbulentes au niveau des parois. L'atténuation du son dans un canal circulaire turbulent liée à la dissipation visco-thermique a notamment été mise en évidence de façon expérimentale par Peters et al. [17] et Ronnenberg et al. [18] et de façon analytique par Howe [15]. De même, si la paroi ne peut plus être considérée comme infiniment mince, alors la question de l'inclinaison et de la forme des perçages doit être posée : les anneaux de vorticité de la couche cisailée ne sont en effet plus axisymétriques en sortie de trou, et la spécificité de leurs caractéristiques de déformation par l'écoulement transverse doit être prise en compte.
3. H5 est un peu limite car le nombre de Mach des jets pour un point de fonctionnement typique de la chambre se situe aux alentours de 0.25 ce qui est proche du régime compressible.
4. H6 peut être prise en défaut compte-tenu de la présence d'un écoulement transverse.
5. H7 peut également être remise en cause puisqu'à l'intérieur des perforations l'extension de la zone de décollement (rotationnelle donc) est d'un ordre de grandeur comparable à celui de la section de passage (voir la Fig. 1b).

## 5 Conclusion

Il appar t donc que la majorité des des hypothèses d'un modèle de Howe avec « bias flow » est questionnable lorsque l'on souhaite faire fonctionner ce modèle sur une paroi perforée de chambre de combustion. Un modèle combinant à la fois les effets liés à la présence simultanée d'un « bias flow » et d'un « grazing flow » semble donc plus adapté à condition que la prise en compte de la longueur, de l'inclinaison, de la forme des trous et du caractère non isotherme de l'écoulement soit également considérée. Devant la difficulté d'un tel développement théorique, le recours à des simulations numériques de type LES de

ces écoulements dans des conditions de fonctionnement et avec des géométries réalistes semble alors une voie attractive et plus aisément envisageable.

*Remerciements* : Monsieur Juan Luis Florenciano bénéficie du soutien financier de l'ANRT au travers d'une convention CIFRE entre Turbomeca et l'UPPA.

## Références

- [1] Sun X., Jung X., Zhang H. and Shi Y., Effect of grazing-bias flow interaction on acoustic impedance of perforated plates. *Journal of Sound and Vibration*, **254**(3), 557-573, 2002.
- [2] Bechert D. W., Sound absorption caused by vorticity shedding, demonstrated with a jet flow. *Journal of Sound and Vibration*, **70**(3), 389-405, 1980.
- [3] Howe M.S., On the theory of unsteady high Reynolds number flow through a circular aperture. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, **366**, 205- 223, 1979.
- [4] Roche J.-M., Leylekian L., Vuillot F., 2D-axisymmetric and 3D computational study of the acoustic absorption of resonant liners. 37<sup>th</sup> International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Shanghai, Chine, 2008.
- [5] Roche J.-M., Vuillot F., Leylekian L., Delattre G., Piot E., Simon F., Numerical and experimental study of resonant liners aeroacoustic absorption under grazing flow. 16<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference, AIAA 2010-3767, Stockholm, Suède, 2010.
- [6] Most A., Étude numérique et expérimentale des écoulements pariétaux avec transfert de masse à travers une paroi multiperforée. Doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2007.
- [7] Michel B., Caractérisation aérodynamique d'un écoulement avec injection pariétale de type dilution giratoire en vue de sa modélisation. Doctorat de l'Université de Toulouse, 2008.
- [8] Mendez, S., Simulation numérique et modélisation de l'écoulement autour des parois multiperforées. Doctorat de l'Université de Montpellier, 2007.
- [9] Karagozian A., Cortelezzi L., Soldati A., Manipulation and control of jets in crossflow, Springer-Verlag Vienne, New York, 2003.
- [10] Muppidi S., Direct numerical simulations and modelling of jets in crossflow, PhD, Université du Minnesota, USA, 2006.
- [11] Uruba V., Mazur O., Jonás P., The jet in crossflow: A few remarks on the cross-flow structure influence: Manipulation and control of jets in crossflow. CISM Courses and Lectures No. 439, Springer-Verlag, Vienne New York, 2003.
- [12] Melling T. H., The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels. *Journal of Sound and Vibration*, **29**(1), 1-65, 1973.
- [13] Crandall I. B., *Theory of vibrating systems and sound*, D. Van Nostrand Inc, New York, 1927.
- [14] Tam C., Kurbatskii K. A., Ahuja K. K., Gaeta R. J., A numerical and Experimental Investigation of the dissipation mechanisms of resonant acoustic liners. *Journal of Sound and Vibration*, **245**(3), 545-557, 2001.
- [15] Howe M.S., On the absorption of sound by turbulence and other hydrodynamic flows. *IMA Journal of Applied Mathematics*, **32**, 187- 209, 1984.
- [16] Howe M. S., *Acoustics of Fluid-Structure Interactions*, Cambridge University Press, 1998.
- [17] Peters M. C. A. M., Hirschberg A., Reijnen A. J., Wijnands A.P.J., Damping and reflection coefficient measurements for an open pipe at low Mach and low Helmholtz numbers. *J. Fluid Mech*, **256**, 499-534, 1993.
- [18] Ronnenberg D., Ahrens, C. D., Wall shear stress caused by small amplitude perturbation of turbulent boundary layer flow: an experimental investigation. *J. Fluid. Mech.*, **83**, 433-464, 1977.
- [19] Rice, E., A theoretical study of the acoustic impedance of orifices in the presence of a steady grazing flow, 91<sup>st</sup> Meeting of the Acoustical Soc. of Am., Washington, D. C., USA, 1976.
- [20] Bellucci V., Flohr P., Paschereit, C. O., Numerical and experimental study of acoustic damping generated by perforated screens, *AIAA Journal*, **42**(8), 1543-1549, 2004.
- [21] Hughes I. J., Dowling A., P., The absorption of sound by perforated linings, *J. Fluid Mech*, **218**, 299-335, 1990.
- [22] Jing X., Sun X., The effect of plate thickness on impedance of perforated plates with bias flow, *AIAA Journal*, **38**, 1573-1578, 2000.
- [23] Scott, M. I., The Rayleigh conductivity of a circular aperture in the presence of a grazing flow, Thèse de Master, Université de Boston, USA, 1995.